



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ Patentschrift  
⑩ DE 101 48 658 C 1

⑤ Int. Cl.<sup>7</sup>:  
C 04 B 35/83  
F 16 D 65/12  
F 16 D 13/38

⑳ Aktenzeichen: 101 48 658.8-45  
㉔ Anmeldetag: 2. 10. 2001  
㉕ Offenlegungstag: -  
㉖ Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 6. 2. 2003

DE 101 48 658 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑦③ Patentinhaber:  
SGL CARBON AG, 65203 Wiesbaden, DE  
  
⑦④ Vertreter:  
Zounek, N., Dipl.-Ing., Pat.-Ass., 65203 Wiesbaden

⑦② Erfinder:  
Bauer, Moritz, 86153 Augsburg, DE; Heine, Michael,  
Dr., 86695 Allmannshofen, DE; Gruber, Udo, 86356  
Neusäß, DE; Hüner, Ronald, Dr., 86405 Meitingen,  
DE; Kienzle, Andreas, Dr., 86672 Thierhaupten, DE;  
Rahn, Andreas, 86637 Wertingen, DE;  
Zimmermann-Chopin, Rainer, Dr., 86679 Ellgau, DE

⑤⑤ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

DE 197 11 829 C1  
DE 198 56 721 A1  
DE 198 34 571 A1  
DE 197 10 105 A1  
EP 07 88 468 B1

⑤④ Verfahren zur Herstellung von Hohlkörpern aus faserverstärkten keramischen Materialien

⑤⑦ Verfahren zur Herstellung von Hohlkörpern aus faserverstärkten keramischen Materialien, wobei im ersten Schritt Kerne hergestellt werden, deren Form der Hohlräume entspricht, im zweiten Schritt ein Grünkörper hergestellt wird, indem in eine Form die genannten Kerne und eine preßfähige Masse gefüllt werden, wobei die preßfähige Masse Kohlenstoffasern und/oder Kohlenstoffäden und Pech und/oder Harze enthält, im dritten Schritt der Grünkörper durch Erwärmen unter Druck verfestigt wird, im vierten Schritt der verfestigte Grünkörper durch Erhitzen unter Ausschluß von Oxydationsmitteln zu einem C/C-Körper carbonisiert wird und gegebenenfalls im fünften Schritt der C/C-Körper unter Erhalt seiner Form mit flüssigem Metall infiltriert wird, wobei zumindest teilweise eine Bildung von Carbiden abläuft, wobei die Kerne aus einem Material bestehen, das im vierten Schritt unzersetzt schmilzt bei einer Temperatur, die oberhalb der Härtungstemperatur der Druckformgebung der Preßmasse liegt, nach diesem Verfahren hergestellte Hohlkörper sowie deren Verwendung als Brems-, Kupplungs- und Reibscheiben.

DE 101 48 658 C 1

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Herstellung von Hohlkörpern aus faserverstärkten keramischen Materialien. Insbesondere betrifft die Erfindung ein Verfahren zur endkonturnahen Herstellung eines porösen faserverstärkten Kohlenstoffhaltigen Formkörpers mit Ausnehmungen oder Hohlräumen, insbesondere eines faserverstärkten C/C-Körpers (mit Kohlenstofffasern verstärkter Kohlenstoff, engl. "CFC" oder "CFRC", carbon fibre reinforced carbon), der aus binderhaltigen Faserstoffmassen mittels eines Preßvorganges unter Verwendung von Preßkernen geformt und in einer nachfolgenden thermischen Behandlung zu C/C umgesetzt wird, sowie gegebenenfalls die Nachverdichtung dieses porösen faserverstärkten Kohlenstoffhaltigen Formkörpers unter Ausbildung einer keramischen Matrix, insbesondere durch eine Flüssigmetall-Infiltration in den C/C-Körper, gegebenenfalls mit anschließender Wärmebehandlung, wobei die Matrix dann Metalle und die durch Reaktion mit dem Kohlenstoff gebildeten Metallcarbide sowie gegebenenfalls Reste von nicht umgesetztem Kohlenstoff enthält.

[0002] Das erfindungsgemäße Verfahren betrifft insbesondere die Herstellung von mit Kohlenstofffasern verstärkten keramischen Verbundwerkstoffen mit Ausnehmungen und Hohlräumen, welche über die Flüssigmetallinfiltration mit Siliciumschmelzen unter Reaktion zumindest eines Teils des Kohlenstoffs zu Siliciumcarbid in mit Kohlenstofffasern verstärkte Verbundwerkstoffe mit SiC-haltiger oder Kohlenstoff- und SiC-haltiger Matrix (C/SiC- oder C/C-SiC-Werkstoffe) umgesetzt werden. Anwendung finden diese Verbundwerkstoffe insbesondere bei Brems-, Kupplungs- und Reibscheiben, sowie als hochtemperaturbeständige Konstruktionswerkstoffe.

[0003] Heutzutage überwiegend verwendete Materialien für Bremsscheiben im Automobilbau sind Stahl oder Grauguß, und in der Luftfahrt mit Kohlenstofffasern verstärkte Kohlenstoff-Werkstoffe (C/C). Die von den Scheibenmaterialien geforderten Eigenschaften sind dabei hohe mechanische Stabilität, Temperaturbeständigkeit, Härte und Verschleißfestigkeit gegenüber dem Reibpartner in der Reibpaarung der Bremse. Die Einsatztemperatur bisher verwendeter Graugußbremsscheiben ist dabei durch den Schmelzpunkt des Materials limitiert. Die mechanische Versagens-temperatur liegt, abhängig von der Belastung, bereits deutlich unterhalb des Schmelzpunktes. Weiterhin tritt durch Umwandlung des metallischen Gefüges beim Erhitzen die Gefahr einer Rißbildung in den Scheiben auf. Die Verwendung von faserverstärkter Keramik als Werkstoff für Bremsscheibenanwendungen erweist sich als Lösung für diese Problematik. Insbesondere Werkstoffe auf der Basis von mit Kohlenstofffasern verstärktem Siliciumcarbid (C/SiC) haben sich für diese Anwendung als geeignet erwiesen. Die Vorteile dieses Materials sind die niedrigere Dichte (damit niedrigeres Gewicht bei gleichem Volumen), die hohe Härte und Temperaturbeständigkeit bis ca. 1400°C und nicht zuletzt die extrem hohe Verschleißbeständigkeit. Das deutlich geringere Gewicht von Bremsscheiben aus diesen C/SiC-Werkstoffen erweist sich als positiver Einflußfaktor zur Verbesserung des Komforts und der Sicherheit durch die Reduktion der ungefederten Massen bei Kraftfahrzeugen und als wirtschaftlicher Faktor im Bereich der Luftfahrt. Die große Härte und Verschleißbeständigkeit von C/SiC-Bauteilen ermöglicht hier weit höhere Standzeiten im Vergleich zu bisher üblichen Materialien auf C/C-Basis oder Metallbasis.

[0004] Verfahren zur Herstellung von C/SiC-Bauteilen sind beispielsweise aus den Schriften DE-A 198 56 721, DE-C 197 11 829 und DE-A 197 10 105 bekannt und um-

- Herstellen einer preßfähigen Mischung aus Kohlenstoffhaltigen Fasern oder Faserbündeln, die mit einer Beschichtung überzogen sein können, einerseits und Füllmitteln und/oder Bindemitteln wie beispielsweise Harzen und/oder Pech andererseits,
- Formgebung der Mischung unter Druck und Temperatur und Carbonisierung der Kohlenstoffhaltigen Füll- und Bindemittel zur Herstellung eines Formkörpers, insbesondere eines aus mit Kohlenstofffasern verstärktem Kohlenstoff bestehenden Formkörpers (C/C) und gegebenenfalls Graphitierung
- Infiltrieren zumindest einer Randschicht des Formkörpers mit einer Silicium-Schmelze und zumindest partielle Reaktion mit dem Kohlenstoff im Formkörper zu SiC, wobei sich ein Formkörper bildet, der wenigstens in der Randschicht aus einer Verbundkeramik mit in einer Matrix aus überwiegend SiC, Si und C eingebetteten, Kohlenstoffhaltigen Fasern besteht (hier ebenfalls als C/SiC bezeichnet).

[0005] Im folgenden soll unter C/SiC allgemein auch die Werkstoffvariante verstanden werden, bei der wie oben beschrieben nur eine Randschicht siliciert wird.

[0006] Zu den üblichen Herstellungsverfahren gehören auch diejenigen, bei denen der C/C-Körper über die Flüssig- oder Gas-Phase mit Kohlenstoff-Vorläufern ("carbon precursors", Substanzen, die beim Erhitzen unter Ausschluß von oxydierenden Medien Kohlenstoff bilden) oder mit Kohlenstoff nachverdichtet wird, oder die Matrix aus überwiegend SiC, Si und C durch eine Gasphaseninfiltration (CVD, Chemical Vapour Deposition, oder CVI, Chemical Vapour Infiltration) oder durch die Pyrolyse von Si-haltigen präkeramischen Polymeren erzeugt wird.

[0007] Heutige metallische Bremsscheiben besitzen häufig von Luft durchströmte Lüftungsschlitze oder -kanäle innerhalb der Scheibe, um das Temperaturniveau der Scheibe zu reduzieren und den Verschleiß der Reibbeläge bei hoher Belastung zu senken. Derartige Lüftungskanäle werden auch bei Bremsscheiben auf C/SiC-Basis ausgebildet, besonders um das Temperaturniveau mit Rücksicht auf die Bremsbeläge und weitere Systemkomponenten zu senken.

[0008] Ein Verfahren zur Herstellung von Reibeinheiten aus C/C-SiC-Werkstoff mit Lüftungskanälen, Hohlräumen und Ausnehmungen, bei dem ein endkonturnah strukturierter poröser Kohlenstoffkörper mit flüssigem Silicium infiltriert wird, ist aus der EP-B 0 788 468 bekannt. Dieses Verfahren nutzt den Umstand, daß sich die Siliciumflüssiginfiltration und Ausbildung der Si- und SiC-reichen Verbundwerkstoff-Matrix nahezu ohne Geometrieänderung des C/C-Vorkörpers vollzieht, so daß die Hohlräume und Ausnehmungen bereits im relativ weichen und gut zu bearbeitenden C/C-Vorkörper angelegt werden können und nicht erst in der sehr harten C/C-SiC-Verbundkeramik. Unter anderem wird vorgeschlagen, die Hohlräume und Ausnehmungen durch lösliche Kerne aus Schaumpolystyrol wie Styropor oder andere Hartschäume, durch pyrolysierbare Kerne aus Polyvinylalkohol, oder durch entnehmbare Kerne aus Gummi, Metall oder Keramik zu bilden.

[0009] Für die verwendete Druckformgebung mit thermischer Aushärtung der Preßmasse erweisen sich die dort als Matrixmaterial vorgeschlagenen Kunststoffe als zu weich und thermisch unbeständig. Die Behandlung mit Lösungsmitteln zur Entfernung der Kerne birgt die Gefahr der Zerstörung des im allgemeinen noch sehr weichen Vorkörpers. Diese Gefahr besteht ebenso bei der Pyrolyse des vorgeschlagenen Kunststoffes Polyvinylalkohol, der beim Erhit-

zen innerhalb der Vorform gasförmige Zersetzungsprodukte bildet, die heftig austreten und den Formkörper sprengen können. Auch die üblichen Metalle und Keramiken sind für die thermischen Prozesse zur Härtung des druckgeformten Grünkörpers und dessen Carbonisierung zum C/C-Vorkörper aufgrund ihrer im allgemeinen unangepaßten thermophysikalischen Eigenschaften ungeeignet.

[0010] In der DE-C 198 24 571 wird ein weiteres Verfahren vorgeschlagen, Hohlräume in einem Werkstück aus C/SiC-Verbundkeramik zu bilden. Die Hohlräume entstehen bei der Vorformfertigung durch Druckformgebung unter Verwendung von Kernen aus Silicium, Siliciumlegierungen oder Si/BN-Mischungen. Dabei werden die Kerne bis zum Schritt der Flüssiginfiltration mit Silicium nicht aus der Vorform entfernt, sondern dienen vielmehr als Siliciumquelle für die Silicierung. Die Vorform muß vor dem Silicieren erhitzt und zu einem C/C-Vorkörper umgesetzt werden, wobei die organischen Bestandteile, wie zum Beispiel Binder, zersetzt werden und eine Schwindung der Vorform eintritt. Diese Schwindung führt zu einem Aufschumpfen des Vorkörpers auf die siliciumhaltigen Kerne, welche ihrerseits durch die Erhitzung noch zusätzlich eine thermische Expansion erfahren. Im allgemeinen treten hier unerwünschte Spannungen oder gar Zerstörungen in der Vorform auf, die es zu vermeiden gilt.

[0011] Aufgabe der Erfindung ist es daher, ein Verfahren zu entwickeln, das zur endkonturnahen Druckformgebung der faserverstärkten Kohlenstoff-haltigen Vorkörper geeignet ist, wobei sich der Kern ohne Beeinträchtigung des ausgehärteten Vorkörpers schonend, einfach und rückstandsfrei entfernen läßt.

[0012] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß Kerne aus Materialien verwendet werden, die oberhalb der Härtungstemperatur bei der Druckformgebung unzersetzt schmelzen und im weiteren thermischen Prozeß gegebenenfalls rückstandsfrei pyrolysiert werden. Die vom Kern befreiten Vorkörper können dann gegebenenfalls der Infiltration mit geschmolzenem Metall, insbesondere Silicierung, zur fertigen Verbundkeramik zugeführt werden.

[0013] Im Rahmen dieser Anmeldung wird Silicium ebenfalls als Metall betrachtet.

[0014] Die Erfindung betrifft daher ein Verfahren zur Herstellung von Hohlkörpern aus faserverstärkten keramischen Materialien, wobei

- im ersten Schritt Kerne hergestellt werden, deren Form der von Hohlräumen in den Hohlkörpern entspricht,
- im zweiten Schritt ein Grünkörper hergestellt wird, indem in eine Preßform die Kerne und eine preßfähige Masse so gefüllt werden, daß die Position der Kerne der Position der zu bildenden Hohlräume entspricht, wobei die preßfähige Masse Kohlenstofffasern und/oder Kohlenstoffäden und Pech und/oder Harze enthält, welche bei Wärmebehandlung unter Ausschluß von Oxydationsmitteln Kohlenstoff-haltige Rückstände bilden,
- im dritten Schritt der Grünkörper durch Erwärmen auf eine Temperatur von 120°C bis 280°C unter Druck verfestigt wird,
- im vierten Schritt der auch als Vorkörper bezeichnete verfestigte Grünkörper durch Erhitzen in einer nicht oxydierenden Atmosphäre auf eine Temperatur von ca. 750°C bis ca. 1100°C zu einem C/C-Körper carbonisiert wird, und gegebenenfalls
- im fünften Schritt der C/C-Körper unter Erhalt seiner Form mit flüssigem Metall infiltriert wird, wobei zumindest teilweise eine Reaktion des Kohlenstoff-

Anteils der Matrix des C/C-Körpers mit dem Metall unter Bildung von Carbiden abläuft,

dadurch gekennzeichnet, daß die Kerne zum überwiegenden Teil aus einem Material bestehen, das im vierten Schritt unzersetzt schmilzt bei einer Temperatur, die oberhalb der Härtungstemperatur der Druckformgebung der Preßmasse liegt.

[0015] Bevorzugt ist der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient des für die Kerne verwendeten Materials bis zu dessen Zersetzungstemperatur höchstens  $1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ .

[0016] "Zum überwiegenden Teil" bedeutet hier mindestens 50% der Masse.

[0017] Bevorzugt werden solche Materialien eingesetzt, deren Schmelztemperatur höchstens 100°C, besonders bevorzugt höchstens 50°C und insbesondere höchstens 30°C über der Temperatur der Verfestigung des Grünkörpers liegt.

[0018] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform werden solche unzersetzt schmelzbaren Materialien für die Kerne eingesetzt, die bei einer Temperatur oberhalb ihrer Schmelztemperatur, bevorzugt mindestens 10°C, insbesondere mindestens 50°C oberhalb ihrer Schmelztemperatur, im wesentlichen rückstandsfrei pyrolysiert werden.

[0019] Werden als Material für die Kerne thermoplastische Kunststoffe eingesetzt, so erfolgt die Herstellung der Kerne bevorzugt über ein Spritzgußverfahren. Allgemein eignen sich die bekannten Formungsverfahren, wie Kalt- oder Heiß-Pressen, Guß, Druckguß oder spanende Bearbeitung, je nach eingesetztem Material.

[0020] Das erfindungsgemäße Verfahren sieht vor, daß im zweiten Schritt preßfähige Massen aus Kohlenstoffasern, thermisch aushärtbaren Bindern, und - insbesondere Kohlenstoff-haltigen - Zuschlagstoffen zu Grünkörpern mit Hohlräumen und/oder Aussparungen verpreßt werden.

[0021] Bevorzugt werden die Kohlenstoffaserschichten des C/C-Vorkörpers in der Nähe des Kerns in vorgegebener Vorzugsrichtung der Kohlenstoff-Verstärkungsfasern auf den Kern aufgebaut. Hierfür werden bevorzugt solche preßfähigen Massen verwendet, die Kohlenstoffasern mit einer mittleren Länge von mindestens 5 mm enthalten. Bevorzugt wird dann die preßfähige Masse des zweiten Schrittes so in die Form gefüllt, daß die Kohlenstoffasern überwiegend parallel zur Richtung der höchsten Zugbeanspruchung des resultierenden Formteils orientiert sind. Überwiegend bedeutet in diesem Zusammenhang mindestens 50%. Es ist auch möglich, die Kerne mit parallel gelegten und gebunden Kohlenstoffäden (englisch "tapes" oder "UDT" = unidirectional tapes genannt) zu umwickeln, und diese Hülle gegebenenfalls mit thermisch aushärtbaren Bindern zu fixieren. Auf diese Schicht vorzugsorientierter Kohlenstoffasern oder -fäden werden dann üblicherweise weitere preßfähige Massen mit geringerer Faser-, oder Faserbündellänge geschichtet.

[0022] In einer anderen bevorzugten Ausführungsform werden Kohlenstoffasern in Form von beschichteten Kurzfaserbündeln eingesetzt. Besonders bevorzugt sind hierbei mit graphitiertem Kohlenstoff beschichtete Fasern, beziehungsweise Faserbündel mit mittleren Längen unterhalb von 5 mm.

[0023] Als thermisch aushärtbare Binder werden Pech wie Kohlenteerpech oder Erdölpech und/oder bevorzugt härtbare Harze wie Phenolharze, Epoxidharze, Polyimide, füllstoffhaltige Mischungen mit Furfurylalkohol oder Furanharze eingesetzt. Die Massen werden hierzu in eine Preßform eingefüllt, wobei in der Form verlorene Kerne vorgeesehen werden. Die Kerne nehmen den Raum der später in der Verbundkeramik zu bildenden Hohlräume oder Aussparungen ein. Nach dem Befüllen der Preßform wird die Masse gepreßt und unter Temperatureinwirkung ausgehär-

tet.

[0024] Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung werden die Kerne aus schmelzbaren Materialien hergestellt, die aus thermoplastischen und rückstandsfrei pyrolysierbaren Polymeren (Kunststoffen) ausgewählt sind, im weiteren auch Thermoplastkerne genannt. Erfindungsgemäß wird das thermoplastische Material für den Kern so gewählt, daß dessen Schmelzpunkt oberhalb der Härtungstemperatur des Formgebungsverfahrens für den Grünkörper, typischerweise im Bereich von 120 bis 300°C, aber deutlich unterhalb der Carbonisierungstemperatur der gepreßten und ausgehärteten Grünkörper liegt. Üblicherweise liegt der Schmelzpunkt bei mindestens 150°C, bevorzugt bei mindestens 180°C und besonders bevorzugt zwischen 220°C und 280°C. Werden als Binder für die preßfähigen Mischungen Phenolharze gewählt, so liegt der Schmelzpunkt des Thermoplasten beispielsweise bevorzugt über 150°C. Für die bevorzugte Preßformgebung und Heiß-Härtung der Binder werden an den Thermoplastkern hohe Anforderungen an die Wärmeformbeständigkeit gestellt. Die Wärmeformbeständigkeitstemperatur (ISO 75A) liegt üblicherweise oberhalb von 80°C, besonders bevorzugt bei mindestens 150°C. Die Härte (Kugeldruckhärte) sollte mindestens 30 MPa betragen.

[0025] Besonders geeignet sind hierbei Polyamide (PA) wie PA 66, Polyimide (PI) wie Polyätherimid (®Ultem, General Electric) oder modifiziertes Polymethacrylimid (PMI, z. B. ®Kamax, Rohm & Haas), Polyoxymethylen (POM) und Polyterephthalate (PETP), sowie deren Copolymere. Nach der Preßformgebung wird der Grünkörper mitsamt dem Thermoplastkern in den C/C-Zustand überführt, das heißt carbonisiert. Dies geschieht im allgemeinen durch Erhitzen unter Schutzgas (Stickstoff) oder im Vakuum auf Temperaturen im Bereich von ca. 750°C bis 1100°C. Wird auf Temperaturen oberhalb von ca. 1800°C erhitzt, findet zusätzlich eine Graphitierung des Kohlenstoffs statt. Dabei ist es wesentlich, daß der Thermoplastkern aufschmilzt und zumindest teilweise aus den Hohlräumen des Grünkörpers ausläuft, ohne sich zu gasförmigen Produkten zu zersetzen. Um den Grünkörper beim Erhitzen bis zum Schmelzpunkt des Thermoplastkerns nicht unter Spannungen zu setzen, liegt der thermische Ausdehnungskoeffizient des Kerns bevorzugt bei höchstens  $1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ .

[0026] Der Thermoplast kann nach dem Ausschmelzen aufgefangen und gegebenenfalls wiederverwendet werden. Besonders bevorzugt wird der Thermoplast aber während des Carbonisierungsschritts pyrolysiert, insbesondere auch deshalb, weil der poröse Grünkörper Reste der Schmelze in den Poren zurückhalten kann. Die Pyrolyse findet dann bei höheren Temperaturen im wesentlichen erst außerhalb des Grünkörpers statt. Hierdurch wird ein Sprengen des Grünkörpers vermieden. Die Pyrolyse, d. h. die Zersetzung zu gasförmigen Produkten, erfolgt üblicherweise oberhalb von 250°C, bevorzugt mindestens 10°C oberhalb des Schmelzpunktes des thermoplastischen Materials. Es ist zweckmäßig, Thermoplaste zu verwenden, die sich nahezu vollständig pyrolysieren lassen, obwohl geringe Kohlenstoffreste nicht störend sind, da sie ja in die später zu bildende Keramikmatrix aufgenommen werden. Für geeignete Polymere liegt der Pyrolyserückstand bei 900°C bei höchstens 10%, besonders bevorzugt maximal 8% und besonders bevorzugt maximal 1%. Gut geeignet sind hierbei Polymere auf der Basis von PA, PMI, POM und PETP. Bevorzugt sind Polyamid 66, Polyoxymethylen, Polyäthylenterephthalat und Polymethacrylimid (PMI), sowie deren Derivate, Copolymere und Mischungen (Blends). Als Komponente von Polymerblends können insbesondere auch weniger temperaturbeständige Polymere eingesetzt werden.

[0027] In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung werden solche Thermoplastkerne verwendet, die zur Verbesserung ihrer Festigkeit und Formbeständigkeit aus Füllstoff-haltigen thermoplastischen Materialien gefertigt werden. Die Füllstoffe liegen als Pulver, Fasern, Mikrokugeln oder Whisker vor und sind ausgewählt aus Glas, mineralischen Füllstoffen wie Kreide, Wollastonit, keramischen Materialien und Metallen. Bevorzugt werden Füllstoffe verwendet, die bis zur Carbonisierung sich weder zersetzen noch schmelzen. Als Pyrolyserückstand nach der Carbonisierung werden die Füllstoffe zurückerhalten, die sich dann entfernen und gegebenenfalls wiederverwenden lassen. Bevorzugt werden faserförmige Füllstoffe wie Glas-, Mineral- oder Kohlenstofffasern eingesetzt. Der Massenanteil an Füllstoffen in dem gefüllten Thermoplast liegt je nach Kernfertigungsverfahren bei mindestens 15%, bevorzugt bei mindestens 30%. Es ist auch möglich, organische nicht pyrolysierbare Stoffe als Füllstoffe zu verwenden, insbesondere carbonisierbare Harze wie die oben erwähnten Binder sind geeignet.

[0028] Ebenso ist es möglich, füllstoffhaltige thermoplastische Materialien einzusetzen, deren Füllstoffe als Pyrolysebeschleuniger wirkende Oxidationsmittel enthalten. Um die Entfernung einer eventuell verbleibende Restmenge des Thermoplastkerns aus dem Grünkörper zu vereinfachen, hat sich diese Beimischung von Oxidationsmitteln als sehr geeignet erwiesen. Diese Oxidationsmittel tragen zur gezielten oxidativen Zersetzung des Thermoplastkerns bei. Besonders bevorzugt sind. Beimischungen von Ammoniumnitrat, beispielsweise in einem Massenanteil von mindestens 10%.

[0029] Die Menge der freigesetzten Pyrolysegase bei der Zersetzung des Kerns läßt sich verringern, und gleichzeitig läßt sich der Carbonisierungsschritt der Grünkörper technologisch vereinfachen, wenn in einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung geschäumte Thermoplaste als Kernmaterial eingesetzt werden. Hier kann beispielsweise geschäumtes Polyimid, wie Polymethacrylimid verwendet werden.

[0030] In einer weiteren Ausführungsform der Erfindung werden Kerne aus niedrigschmelzenden Metallen verwendet. Prozeß und Anforderungen an die Materialien sind mit denen im Fall der Thermoplastkerne bis zum Schritt des Ausschmelzens nahezu identisch. Gegenüber den Thermoplasten liegt der Vorteil der Metalle in ihrer wesentlich höheren Festigkeit, im Gegensatz zur den Thermoplastkernen ergibt sich die Möglichkeit zur Pyrolyse aber nicht. Daher ist es zweckmäßig, die geschmolzenen Metalle aufzufangen und wiederzuverwenden. Besonders geeignet sind niedrigschmelzende Metallegierungen mit Schmelzpunkten unterhalb von 300°C. Üblicherweise werden Legierungen auf Basis der Metalle Al, Zn, Cu, Bi, Pb, Sn, Fe, Sb und Si verwendet. Im Falle der Metallegierungen haben sich Wismut und Wismutlegierungen als sehr gut geeignet erwiesen, da sie bei niedriger Temperatur schmelzen und einen negativen thermischen Ausdehnungskoeffizienten besitzen. Dies vermeidet das Sprengen des Grünkörpers bei Erwärmung. Die ausgeschmolzenen Metalle können nach dem Ausschmelzen wieder in den Produktionsprozeß zurückgeführt werden. Neben diesem wirtschaftlichen und ökologischen Vorteil ist der größte Vorteil der Verwendung eines metallischen Kerns seine sehr leichte Herstellbarkeit in einer Gießform. Besonders bevorzugt sind Bi- und Sn-Legierungen, sowie Zn/Mg/Al/Cu-Legierungen.

[0031] Nach der Carbonisierung des Grünkörpers werden gegebenenfalls angefallene Pyrolyse-, beziehungsweise Kohlenstoffreste in den gebildeten Hohlräumen beseitigt und es wird ein poröser C/C-Körper mit Hohlräumen oder Ausnehmungen erhalten, der sich weiterverwerten läßt. Er

kann nachbearbeitet oder wiederum zu komplexeren Strukturen zusammengesetzt oder geklebt werden.

[0032] Im einem fünften Schritt wird der poröse C/C-Körper gegebenenfalls nachverdichtet, um zu einem besser gebrauchsfähigen Werkstück zu gelangen.

[0033] In einer bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens wird der Kohlenstoff des C/C-Körpers durch eine Schmelzinfiltration mit Metallen und die gegebenenfalls anschließende Wärmebehandlung zumindest teilweise zu den entsprechenden Carbiden umgesetzt. Bevorzugt ist die Schmelzinfiltration mit Silicium, wobei sich zumindest ein Teil des Kohlenstoffs (bevorzugt der Kohlenstoff in der Matrix) zu Siliciumcarbid umsetzt; die Matrix enthält dann SiC, nicht umgesetzten Kohlenstoff sowie nicht umgesetztes Silicium. Hierzu wird der C/C-Körper mit Siliciumpulver überschichtet und auf Temperaturen von ca. 1500 bis ca. 1800°C im Vakuum erhitzt. Je nach beabsichtigter Verwendung ist es dabei nicht zwingend notwendig, den gesamten C/C-Körper in C/SiC umzusetzen, im allgemeinen wird aber zumindest die Randschicht zu C/SiC umgesetzt. Obwohl die Siliciumschmelzinfiltration das bevorzugte Verfahren ist, kann der C/C-Körper auch mit anderen üblichen Verfahren unter Ausbildung der in der Verbundwerkstofftechnologie gängigen Matrices nachverdichtet werden. Insbesondere kann das Flüssigsiliciumverfahren auch mit Siliciumlegierungen durchgeführt werden, die unter anderem Metalle wie Cr, Fe, Co, Ni, Ti und/oder Mo enthalten können.

[0034] Das beschriebene Verfahren kann bevorzugt zur Herstellung von Bremsscheiben oder Kupplungsscheiben verwendet werden. Hierbei werden in eine zylindrische Form die preßfähige Masse sowie die Kerne gefüllt, wobei als unterste und oberste Lage bevorzugt durchgehende Schichten der preßfähigen Masse gefüllt werden. Die Dicke der Boden- und Deckschicht beträgt nach dem Verpressen vorzugsweise mindestens 7 mm. Diese Schichten bilden die Reibschicht der Brems- oder Kupplungsscheibe. Der Formkörper, der die Brems- oder Kupplungsscheibe bildet, hat üblicherweise die Gestalt einer Ringscheibe, d. i. der achsennahe Raum ist durchgehend über die gesamte Dicke der Scheibe leer. Die Kerne werden bevorzugt rotationssymmetrisch um die Achse des Zylinders angeordnet, wobei bevorzugt mindestens 2 und höchstens 16 Kerne eingesetzt werden. Die Form der Kerne ist bevorzugt derart, daß die gebildeten Hohlräume von der Peripherie des zylindrischen Formkörpers bis zum inneren Rand des Formkörpers reichen und damit einen offenen Durchgang zwischen dem inneren und äußeren zylindrischen Rand der Ringscheibe bilden.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung von Hohlkörpern aus faserverstärkten keramischen Materialien, wobei im ersten Schritt Kerne hergestellt werden, deren Form der der Hohlräume entspricht, im zweiten Schritt ein Grünkörper hergestellt wird, indem in eine Form die genannten Kerne und eine preßfähige Masse gefüllt werden, wobei die preßfähige Masse Kohlenstoffasern und/oder Kohlenstoffäden und Pech und/oder Harze enthält, welche bei Wärmebehandlung unter Ausschluß von Oxydationsmitteln Kohlenstoffhaltige Rückstände bilden, derart daß die Lage der Kerne der gewünschten Lage der zu bildenden Hohlräume entspricht, im dritten Schritt der Grünkörper durch Erwärmen auf eine Temperatur von 120°C bis 280°C unter einem Druck verfestigt wird,

im vierten Schritt der auch als Vorkörper bezeichnete verfestigte Grünkörper durch Erhitzen in einer nicht oxydierenden Atmosphäre auf eine Temperatur von ca. 750°C bis ca. 1100°C zu einem C/C-Körper carbonisiert wird, dadurch gekennzeichnet, daß die Kerne aus einem Material bestehen, das im vierten Schritt unzersetzt schmilzt bei einer Temperatur, die oberhalb der Härtungstemperatur bei der Druckformgebung der preßfähigen Masse liegt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß anschließend an den vierten Schritt im fünften Schritt der C/C-Körper unter Erhalt seiner Form mit flüssigem Metall infiltriert wird, wobei zumindest teilweise eine Reaktion des Kohlenstoff-Anteils der Matrix des C/C-Körpers mit dem Metall unter Bildung von Carbiden abläuft.

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß solche schmelzbaren Materialien für die Kerne eingesetzt werden, die bei einer Temperatur oberhalb ihrer Schmelztemperatur im wesentlichen rückstandsfrei pyrolysiert werden.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß der Pyrolyserückstand des schmelzbaren Materials für den Kern höchstens 10% beträgt.

5. Verfahren nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die preßfähige Masse des zweiten Schrittes als Verstärkungsmittel Kohlenstoffasern mit einer mittleren Länge von mindestens 5 mm enthält.

6. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die preßfähige Masse des zweiten Schrittes so in die Form gefüllt wird, daß die Kohlenstoffasern überwiegend parallel zur Richtung der höchsten Zugbeanspruchung des resultierenden Formteils orientiert sind.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die preßfähige Masse des zweiten Schrittes als Verstärkungsmittel Kohlenstoffasern in Form von beschichteten Kurzfaserbündeln enthält.

8. Verfahren nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Material der preßfähigen Massen Pech ausgewählt aus Kohlenteerpech oder Erdölpech und/oder härtbare Harze ausgewählt aus Phenolharzen, Epoxidharzen, Polyimiden, füllstoffhaltigen Mischungen mit Furfurylalkohol und Furanharzen enthält.

9. Verfahren nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Material der Kerne einen linearen thermischen Ausdehnungskoeffizient bis zu seiner Zersetzungstemperatur von höchstens  $1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  aufweist.

10. Verfahren nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß das Material für den Kern ein thermoplastisches Polymer mit einer Wärmeformbeständigkeitstemperatur gemäß der Norm ISO 75A von mindestens 80°C und einer Kugeldruckhärte von mindestens 30 MPa ist.

11. Verfahren nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Material für den Kern ein Füllstoff-haltiges thermoplastisches Polymer ist, wobei der Massenanteil des Füllstoffs in dem Füllstoff-haltigen thermoplastischen Polymeren mindestens 15% beträgt.

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Füllstoffe ausgewählt sind aus Kreide, Glaskugeln, Mikrogaskugeln, Wollastonit, Glasfasern, Kohlenstoffasern, und keramischen Fasern.

13. Verfahren nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß als Material für den Kern ein füllstoffhaltiges thermoplastisches Polymer eingesetzt wird, dessen Füllstoffe als Pyrolysebeschleuniger wirkende Oxidationsmittel enthalten. 5

14. Verfahren nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß als Material für den Kern ein geschäumter Thermoplast eingesetzt wird. 10

15. Verfahren nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche 1, 2, und 5 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß als Material für den Kern niedrigschmelzende Metalle verwendet werden.

16. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß niedrigschmelzende Metallegierungen mit Schmelzpunkten unterhalb 300°C verwendet werden. 15

17. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß Legierungen auf der Basis der Metalle Al, Zn, Cu, Bi, Pb, Sn, Fe, Sb und Si verwendet werden. 20

18. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß die Metalle ausgewählt sind aus Wismut und Wismutlegierungen, Zinn-Legierungen sowie Zn/Mg/Al/Cu-Legierungen. 25

19. Verwendung von Hohlkörpern mit scheibenförmiger Außenkontur hergestellt nach dem Verfahren des Anspruchs 1 als Brems- oder Kupplungsscheiben.

20. Verwendung von Hohlkörpern mit scheibenförmiger Außenkontur hergestellt nach dem Verfahren des Anspruchs 2 als Brems- oder Kupplungsscheiben. 30

35

40

45

50

55

60

65